

# EFEKTIFITAS PEMAKAIAN REAKTOR *SHUNT* GITET UNGARAN DALAM MENGKOMPENSIR DAYA REAKTIF SUTET 500 KV UNGARAN – BANDUNG SELATAN

M.Toni Prasetyo<sup>1)</sup> dan Andika Akhmad<sup>2)</sup>

<sup>1,2)</sup>Jurusan Teknik Elektro  
Fakultas Teknik  
Universitas Muhammadiyah Semarang  
Email: [toniprast@gmail.com](mailto:toniprast@gmail.com)

## ABSTRAK

Operasi sub jaringan tegangan ekstra tinggi Jawa Bali pada saluran panjang tanpa pembangkit yaitu Ungaran - Bandung Selatan dalam keadaan tanpa beban / beban rendah akan timbul arus pengisian relatif tinggi karena pengaruh adanya kapasitansi saluran ke tanah. Arus pengisian yang tinggi mengakibatkan terjadinya daya reaktif kapasitif (Mvar) yang besar. Daya reaktif yang dibangkitkan oleh SUTET 500 KV adalah kurang lebih 1 (satu) Mvar per kms, jadi jika jarak Ungaran - Bandung Selatan adalah 342,847 Kms maka daya reaktif yang dibangkitkan kurang lebih 343 Mvar. Akibatnya tegangan sisi terima akan lebih tinggi dari tegangan sisi kirim, melebihi batas toleransi yang diijinkan oleh PT PLN (Persero) yaitu > 5% diatas tegangan nominal 500 KV. Karena tegangan 500 KV lebih tinggi dari tegangan nominalnya maka direspon pula oleh tegangan kerja dibawahnya yaitu 150 KV dan 20 KV akan lebih tinggi juga yang pada akhirnya berpengaruh terhadap sistem kelistrikan Jawa Bali termasuk konsumen / beban.

Untuk mengatasi adanya gejala kenaikan tegangan sisi terima lebih tinggi dari sisi kirim (terutama saluran panjang) perlu dipasang alat kompensasi berupa reaktor shunt pada kedua ujung, sisi terima maupun sisi kirim.

**Kata kunci:** Reaktor shunt, Kompensasi, Tegangan Tinggi

## PENDAHULUAN

Operasi sub jaringan tegangan ekstra tinggi Jawa Bali pada saluran panjang tanpa pembangkit yaitu Ungaran-Bandung Selatan dalam keadaan tanpa beban / beban rendah maka akan timbul arus pengisian relatif tinggi karena pengaruh adanya kapasitansi saluran ke tanah. Arus pengisian yang tinggi

mengakibatkan terjadinya daya reaktif kapasitif (MVAR) yang besar. Daya reaktif yang dibangkitkan oleh SUTET 500 KV adalah kurang lebih 1 (satu) MVAR per kms, jadi jika jarak Ungaran-Bandung Selatan adalah 342,847 Kms maka daya reaktif yang dibangkitkan kurang lebih 343 MVAR. Akibatnya tegangan di sisi terima akan lebih tinggi dari tegangan di sisi kirim

melebihi batas toleransi yang diijinkan oleh PT PLN (Persero) yaitu  $> 5\%$  diatas tegangan nominal 500 KV. Karena tegangan 500 KV lebih tinggi dari tegangan nominalnya maka direspon pula oleh tegangan kerja dibawahnya yaitu 150 KV dan 20 KV akan lebih tinggi juga yang pada akhirnya berpengaruh terhadap sistem kelistrikan Jawa Bali termasuk konsumen / beban.

## 1. TINJUAN PUSTAKA

### 1.1. Saluran Udara pada Sistem Transmisi

Saluran transmisi berfungsi menyalurkan tenaga listrik dari pusat-pusat pembangkit listrik ke beban/konsumen (Hutauruk. TS. Ir. MSc, 1985).

#### 1.2.1. Impedansi Seri Saluran Transmisi

Suatu saluran transmisi mempunyai 4 (empat) parameter yang mempengaruhi kemampuan hantar arus (*capacity carrying current*) yaitu : Resistansi (R), Induktansi (L), Kapasitansi (C) dan Konduktansi (G).

Pada saluran udara transmisi tegangan tinggi / ekstra tinggi (SUTT / SUTET) konduksi (G) sangat kecil maka untuk perhitungan-perhitungan analisis konduktansi G diabaikan sehingga perhitungan-perhitungan akan jauh lebih mudah dan pengaruhnya masih dalam batas-batas yang diijinkan.

#### 1.2.1. Penghantar Berkas (*Bundled Conductor*)

Efek kulit (*Skin Effect*) konduktor tunggal tiap fasa pada Tegangan Ekstra Tinggi mengakibatkan terjadinya korona (rugi-rugi daya yang berada pada kulit konduktor), radio interferensi dan kuat medan *electro magnetic/static* yang besar.

Dengan mempergunakan 2 (dua) atau lebih konduktor tiap fasa yang disusun dengan menggunakan pengikat konduktor (spacer) dengan jarak pemisah antar fasa-fasanya, maka gradien Tegangan Tinggi pada penghantar dapat dikurangi. Konduktor semacam ini dikatakan sebagai konduktor **berkas** (*bundled*).

Dalam menentukan Impedansi pada konduktor berkas maka berlaku juga persamaan-persamaan untuk menentukan impedansi urutan yang telah diuraikan sebelumnya (H. Hidayat. Ir, 1994).

Untuk konduktor berkas berlaku rumus :

$$R_a(\text{berkas}) = \frac{r_a}{n}$$

Dimana  $n$  = jumlah konduktor per fasa.

Demikian pula untuk menghitung impedansi sendiri dan bersama maka penghantar berkas  $D_s$  diganti dengan  $D_s^b$  dimana harga-harga  $D_s^b$  adalah sebagai berikut :

- Untuk berkas dua konduktor

$$D_s^b = \sqrt[4]{(D_s \cdot d)^2} = \sqrt{D_s \cdot d}$$

- Untuk berkas tiga konduktor

$$D_s^b = \sqrt[9]{(D_s \cdot d \cdot d)^3} = \sqrt[3]{D_s d^2}$$

- Untuk berkas empat konduktor

$$D_s^b = \sqrt[16]{(D_s \cdot d \cdot d \cdot d \cdot 2^{1/2})^4} = 1,094 \sqrt{D_s \cdot d^3}$$

Dimana :

$D_s^b$  = GMR dari konduktor berkas

$$D_s = \text{GMR dari sub-konduktor } d =$$

jarak antara dua sub-konduktor.

### 1.2.2. Saluran Tunggal Tiga Fasa Dengan Jarak Pemisah Tidak Sama

Saluran tunggal tiga fasa dengan jarak pemisah tidak sama mempunyai fluks gandeng dan induktansi tidak sama tiap masing-masing fasa. Induktansi yang berlainan setiap fasa menghasilkan suatu rangkaian yang berlainan. Keseimbangan ketiga fasa dapat dikembalikan dengan mempertukarkan dengan posisi-posisi penghantar pada selang jarak yang teratur disepanjang saluran sedemikian rupa sehingga setiap penghantar akan menduduki posisi semula penghantar yang lain pada suatu jarak yang sama. Pertukaran posisi penghantar disebut (*transposition*).

Kondisi fluks gandeng dan induktansi setelah transposisi adalah seimbang dan sama dengan saluran dan

jarak pemisah sama (Joseph A. Edminser. Ir, 1994).

(2.20)

$$\text{Besarnya } D_{eq} = D_m \sqrt[3]{D_{ab} D_{bc} D_{ac}}$$

Meter dan besarnya  $D_s$  sesuai dengan konduktor tunggal maupun konduktor berkas.

(2.21)

### 1.2.3. Saluran Ganda Tiga Fasa

Saluran ganda tiga fasa mempunyai 2 (dua) konduktor paralel per fasa dan arus terbagi rata antara kedua konduktor, baik karena susunan konduktor yang simetris maupun yang transposisi.

Kedua konduktor saluran 1 dan saluran 2 ditopang oleh satu menara yang biasanya dinamakan dua sirkit (double circuit) sehingga jarak kedua saluran tidak begitu besar oleh karenanya induktansi bersama tidak dapat diabaikan dimana :

$$\text{GMD} = \sqrt[12]{d_{12} d_{13} d_{15} d_{16} d_{23} d_{24} d_{26} d_{34} d_{35} d_{45} d_{46} d_{56}}$$

$$\text{GMR} = \sqrt[9]{d_{11} d_{12} d_{13} d_{21} d_{22} d_{23} d_{31} d_{32} d_{33}} \text{ Meter}$$

### 1.2.4. Hubungan Arus dan Tegangan

#### Pada Saluran Transmisi

Representasi saluran transmisi menggambarkan hubungan antara tegangan dan arus dengan memperhitungkan fakta bahwa keempat parameter yaitu R, L, C, dan G sebenarnya tersebar merata sepanjang saluran transmisi. Saluran panjang-menengah dapat dipresentasikan dengan R dan L sebagai parameter terpusat

dan setengah kapasitansi ke netral dari saluran terpusat pada masing-masing ujung ekivalen. Konduktansi paralel (*shunt conductance*)  $G$  diabaikan dalam perhitungan tegangan dan arus pada saluran transmisi daya.

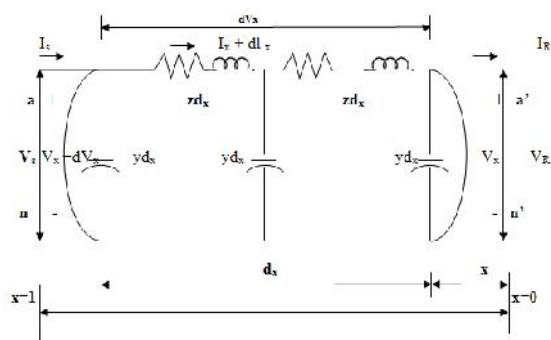
#### 1.2.4.1. Saluran Transmisi Jarak

##### Menengah

Saluran transmisi jarak menengah, admitansi shunt yang merupakan kapasitansi murni dapat ditempatkan pada satu titik di tengah saluran (nominal T) atau pada 2 (dua) titik ditempatkan pada masing-masing ujung pengirim dan penerima (nominal  $\Pi$ ).

#### 1.2.4.2. Saluran Panjang

Dalam saluran panjang (*long distance*) rangkaian parameter sebenarnya tidak terpusat menjadi satu, melainkan tersebar merata di seluruh panjang satuan.



Gambar.1. Saluran Panjang

#### 1.2.4.3. Effect Ferranti Pada Jaringan

##### Tegangan Ekstra Tinggi

Effect *ferranti* merupakan gejala medan listrik akibat adanya distribusi kapasitansi sepanjang saluran transmisi

yang menyebabkan tegangan di sisi terima lebih tinggi dari tegangan di sisi kirim (William D. Stevenson. Ir, 1990).

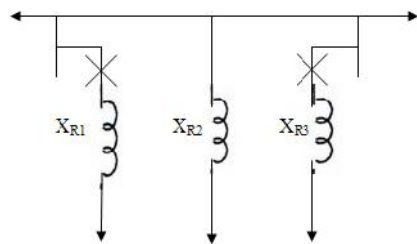
#### 1.2.4.4. Reaktor Shunt

Reaktor *shunt* adalah suatu kumparan yang dipasang paralel dengan sistem sehingga mempunyai kemampuan untuk menyerap daya reaktif kapasitif dari sistem tenaga listrik sesuai dengan kapasitas terpasang (daya dan tegangan kerja) reaktor shunt tersebut.

Reaktor shunt dioperasikan (digunakan) pada sistem yang mempunyai arus pengisian yang besar pada saat beban ringan/rendah, disamping itu reaktor shunt digunakan untuk memperkecil *momentary over voltage* karena terputusnya saluran transmisi pada salah satu ujungnya, digunakan juga saat pengisian line (energize) pada jaringan transmisi yang panjang. Reaktor shunt dapat dipasang langsung pada line transmisi, bus tegangan ekstra tinggi, atau melalui kumparan tersier transformator 1 fasa 3 kumparan (*1 phase three pole*) yang berfungsi untuk penyerapan tegangan sekunder saat beban ringan / rendah (Weddy BM, 1988).

Reaktor shunt dipergunakan dalam mengkompensir sistem tenaga listrik Jawa Bali yang dipasang pada sisi Bus 500 KV, Line maupun sisi tersier 66 KV Trafo interbus (Trafo IBT) 500/150/66 KV

dikarenakan cara pengoperasiannya yang relatif mudah. Kompensasi dengan kapasitor seri maupun menggunakan SVC (alat kompensasi yang dapat berfungsi sebagai reaktor maupun kapasitor shunt 500 KV) belum dipergunakan.



$X_{R2}$  = Reactor line permanent

$X_{R1}, X_{R3}$  = Reactor bus dioperasikan masuk keluar

Gambar.2. Pemasangan Reactor Shunt

## 2, METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode deskriptif analisis yaitu mengumpulkan data, mengolah dan menghitung, kemudian ditarik suatu kesimpulan dan memberikan saran-saran berdasarkan hasil analisa serta kesimpulan yang didapat.

### 2.1. Kenaikan Tegangan Akibat Beban

#### Rendah Pada Saluran Transmisi

#### Ungaran-Bandung Selatan

Sistem Interkoneksi kelistrikan Jawa Bali diantaranya disuplai oleh pembangkit berskala besar (>100 MW) yang terletak di daerah Paiton 3200 MW, Grati 700 MW, Gresik 1350 MW (Jawa Timur), Tambak Lorok 1300 MW (Semarang), Saguling 700

MW, Cirata 1.000 MW (Jawa Barat), Priok 1.170 MW, Muara Karang 1.150 MW, Muara Tawar 910 MW (DKI Jakarta) dan Suralaya 3400 MW (Banten). Pembangkitan berskala besar tersebut output tegangannya setelah melalui Trafo step-up terdapat dua sub sistem tegangan yaitu sub sistem 500 KV dan sub sistem 150 KV. Sub sistem 500 KV yaitu Paiton, Grati, Gresik 900 MW (Jatim), Saguling, Cirata (Jabar), Muara Tawar (DKI Jakarta), dan Suralaya (Banten). Sedangkan sub sistem 150 KV adalah Gresik 350 MW, Tambak Lorok (Semarang), Priok dan Muara Karang

Kendala yang dihadapi saat ini adalah jarak transfer yang panjang (long length transmision) SUTET 500 KV antara Surabaya Barat – Ungaran (252 Kms) dan Ungaran – Bandung Selatan (343 Kms). Pada saat beban penuh (hari kerja normal) akibat efek feranti yang mengakibatkan daya reaktif kapasitif saluran relatif besar dapat diserap oleh beban sehingga tidak terjadi kelebihan tegangan (*over voltage*), tetapi pada kondisi beban rendah (*low load condition*) yaitu pada hari libur/besar MVAR jaringan tidak dapat terserap oleh beban sehingga mengakibatkan tegangan pada *substation* (GITET) melebihi operasional tegangan kerja yang diijinkan

dari tegangan nominal (+5% sampai dengan -10%).

## 2.2. Rangkaian Ekuivalen Saluran

### Transmisi Ungaran – Bandung Selatan

Dilihat dari jarak Kms saluran transmisi Ungaran - Bandung Selatan yaitu 343 Kms, maka rangkaian ekuivalen yang digunakan adalah rangkaian saluran panjang yang berarti kapasitansi terbagi rata sepanjang saluran.

Selanjutnya untuk keperluan analisis perhitungan mempergunakan saluran panjang dengan memperhitungkan pengaruh kapasitansi untuk memperoleh hasil yang lebih teliti.

Karena saluran transmisi menggunakan sistem tiga fasa yang keadaan arus dan tegangan adalah simetris (dengan atau tanpa transposisi), maka analisisnya cukup dilakukan satu fasa. Sedangkan untuk uraian analisis dan perhitungannya menggunakan konstanta ABCD.

## 2.3. Pembangkitan Daya Reaktif Pada

### SUTET Bandung Selatan–Ungaran

#### Kondisi Beban Rendah

Transfer energi melalui transmisi yang panjang dengan menggunakan tegangan bolak-balik (AC) pada saat beban rendah (*low load condition*) menyebabkan terjadinya muatan yang besar pada penghantar–penghantarnya di setiap titik

(simpul). Aliran muatan adalah arus listrik, arus yang disebabkan oleh pengisian dan pengosongan (charge dan discharge) suatu saluran karena tegangan bolak-balik disebut arus pengisian, arus pengisian selalu mengalir dalam saluran transmisi meskipun saluran tersebut dalam kondisi terbuka (*open circuit*). Arus pengisian karena pengaruh kapasitansi saluran akan menimbulkan daya reaktif. Besarnya daya reaktif yang dibangkitkan oleh SUTET 500 KV adalah kurang lebih 1 (satu) Kms = 1 (satu) MVAR. Jika saluran 3 (tiga) fasa Bandung Selatan – Ungaran panjang  $\pm 343$  km, maka daya reaktif yang dibangkitkan = 343 MVAR.

Untuk mengkompensir daya reaktif yang demikian besar, perlu dipasang induktor berupa Reaktor Shunt sebesar 343 MVAR yang dibangkitkan oleh SUTET tersebut yang dipasang di Ungaran dan Bandung Selatan.

## 2.4. Kompensasi Pada Saluran Transmisi

Saluran udara tegangan ekstra tinggi (SUTET) 500 KV Ungaran - Bandung Selatan merupakan saluran panjang sehingga membutuhkan peralatan kompensasi untuk mengontrol tegangan kerja di setiap simpul di sepanjang saluran yang berfungsi memperkecil panjang dielektrik  $\theta$  pada SUTET tersebut.

Tujuannya untuk memperbaiki / menaikkan kapasitas saluran daya.

Pada saat ini alat kompensasi saluran panjang SUTET yang digunakan adalah Reaktor Shunt yang tersambung pada sisi Bus 500 KV, sisi Line maupun sisi Tersier Trafo Interbus (Trafo IBT) 500/150/66 KV, untuk jalur utara dipasang di GITET Bandung Selatan, GITET Ungaran dan GITET Krian (Surabaya Barat), sedangkan jalur selatan dipasang di GITET Kediri, GITET Pedan dan GITET Tasik. Adapun di daerah lain seperti GITET Saguling, GITET Cirata, GITET Gandul dan GITET Tanjungjati yang relatif dekat dengan pembangkit, pengaturan daya reaktif dengan cara menaikkan atau menurunkan eksitasi di pembangkitan (*over or under exciter*).

## 2.5. Data Teknis Lapangan

### 2.5.1 Panjang Saluran Transmisi

Panjang saluran transmisi antara Ungaran - Bandung Selatan adalah 342.81 kms, penghantarnya dibagi menjadi 2 (dua) bagian. Dari Bandung Selatan–Mandirancan (Cirebon) panjang saluran 119,167 Kms menggunakan konduktor ACSR gannet, dari Mandirancan–Ungaran panjang saluran 223,680 kms menggunakan ACSR dove. Luas penampang gannet =  $4 \times 392,84 \text{ mm}^2$  dan luas penampang dove =  $4 \times 327,84 \text{ mm}^2$ . Keempat konduktor baik

gannet maupun dove dihubungkan satu sama lain menggunakan pengikat konduktor (*spacer*) dengan jarak konduktor satu dengan konduktor yang lain sebesar 450 mm yang terpasang setiap jarak 50 meter sehingga GMD maupun GMR dianggap sama dari Bandung Selatan sampai Ungaran.

### 2.6. Impedansi Seri Saluran Transmisi

Impedansi seri saluran transmisi antara Bandung Selatan–Ungaran dengan tegangan kerja 500 KV adalah

Penghantar Bandung Selatan–Cirebon,  $z = 0,022 + j0,278$

Penghantar Cirebon–Ungaran  $z = 0,0261 + j 0,2763$

Rating tegangan dan arus :

Rating tegangan nominal = 500 KV

Rating arus nominal = 2000 Ampere.

Tabel 3.1

Data Untuk Saluran Transmisi Tegangan Ekstra Tinggi 500 KV Bandung Selatan – Ungaran

Saluran	Panjang Saluran Kms	Tipe	OHM/ KM			T <sub>eg</sub> (KV)	I <sub>nom</sub> (Amp)
			R	X	Z		
BDSLN - CIRBN	119,167	GANNET	0,022	0,278	0,278	55,47	500
CIRBN - UNGHN	223,68	DOVE	0,0261	0,2763	0,277	84,50	500

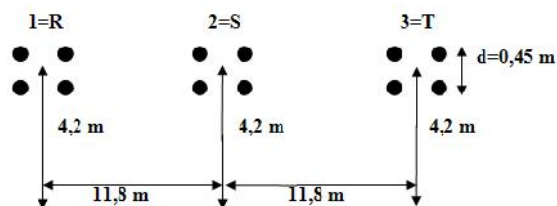
### 2.5.3. Konfigurasi Saluran Transmisi

Gambar 3.2 memperlihatkan penampang dari saluran transmisi 3 (tiga) fasa antara Bandung Selatan–Ungaran yang bekerja pada frekuensi 50 Hz. Jenis konduktor yang digunakan adalah ACSR (Alumunium Conductor Steel Reinforced) type gannet

untuk saluran Bandung Selatan–Cirebon dan type dove untuk saluran Cirebon–Ungaran. Sedangkan diameter luar masing–masing konduktor adalah :

Saluran Bandung S–Cirebon = 25,76 mm

Saluran Cirebon–Ungaran = 23,55 mm



Gambar 3. Penampang Saluran Transmisi Antara Bandung Selatan – Ungaran

#### 2.5.4. Data Teknis Reaktor Shunt

Reaktor shunt GITET Ungaran dipasang disisi Bus 500 KV dan sisi tersier 66 KV Trafo IBT 500/150/66 KV.

##### Data teknis Reaktor sisi Bus 500 KV

Jenis Reaktor: 3 x 1 fasa

Hubungan: Y (Bintang)

Untuk data reaktor tiap fasanya:

Kapasitas daya reaktif: 100 MVAR

Rating tegangan:  $500 / \sqrt{3}$  KV

Rating arus: 11,2 Ampere

Frekuensi: 50 Hz

Impedansi: 2500 Ohm  $\pm$  5 %

##### Data teknis Reaktor sisi tersier Trafo IBT 500/150/66 KV

Jenis Reaktor: 3 fasa

Kapasitas daya reaktif: 105 MVAR

Rating tegangan: 66 KV

Rating arus: 918,5 ampere

Frekuensi: 50 Hz

Kapasitas beban lebih untuk 10 menit: 23

MVAR pada 71,5 KV dan 993 Amp

Impedansi: 41,49 ohm / fasa  $\pm$  5 %

#### 2.5.5. Data Teknis Tiang 500 KV SUTET Ungaran - Bandung Selatan

Tiang 500 KV SUTET Ungaran - Bandung Selatan berjumlah sekitar 400 tiang. Perhitungannya setiap jarak 500 meter tanpa halangan (tidak berbelok dan tidak ada sungai atau yang membatasi lainnya) berdiri 1 (satu) tiang dan jarak bervariasi lainnya pada kondisi medan yang berat (sungai, belokan, bukit dan medan sulit lainnya) berdiri lagi 1 (satu) tiang. Jadi dengan 342,847 kms jarak Ungaran - Bandung Selatan sekitar 400 tiang menara.

##### Data teknis tiang 500 KV Ungaran - Bandung Selatan.

Jenis tiang : Tunggal

Bentuk tiang : Delta

Tinggi tiang : 44,8 Meter s/d 100 Meter

Jenis Konduktor: ACSR

Tipe Konduktor: Ganet dari Bandung Selatan–Cirebon, Dove dari Cirebon–Ungaran.

Jarak Konduktor ke tanah minimal 34,480m

Lebar keliling kaki tiang: 10 Meter

Penampang konduktor

- Type Ganet = 4 x 392,84 mm<sup>2</sup>

- Type Dove = 4 x 327,84 mm<sup>2</sup>

Jarak Spacer satu sama lain: 50 meter

Penampang spacer: 450 mm



### 3. PEMBAHASAN

#### 3.1 Perhitungan dan Analisis Pemakaian

##### Reaktor Shunt

##### Analisa Perhitungan Daya Reaktif

##### Saluran Ungaran - Bandung Selatan

Dari data diketahui bahwa impedansi seri saluran transmisi Ungaran - Bandung Selatan adalah  $Z = 95,30 \angle 84,90^\circ$  Ohm / fasa.

Untuk mengetahui admitansi paralel terlebih dahulu dihitung kapasitansi saluran transmisinya.

Dan dari konfigurasi saluran transmisi (gambar 3.2) diperoleh :

$$\begin{aligned} D_{12} &= 11,8 \text{ m} \\ D_{23} &= 11,8 \text{ m} \\ D_{31} &= 23,6 \text{ m} \\ d &= 0,45 \text{ m} \end{aligned}$$

Jadi jarak rata-rata geomterik (GMD) dan radius rata-rata geometrik (GMR) adalah :

Penghantar Bandung Selatan – Ungaran :

$$\begin{aligned} \text{GMD} &= \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{31}} \quad \text{m} \\ &= \sqrt[3]{11,8 \cdot 11,8 \cdot 23,6} \quad \text{m} \\ &= 14,86707 \quad \text{m} \end{aligned}$$

Penghantar Bandung Selatan – Cirebon

$$\begin{aligned} D_{sc}^b &= 1,09 \sqrt[4]{r \cdot d^3} \quad \text{m} \\ &= 1,09 \sqrt[4]{0,01288 \cdot (0,45)^3} \\ &= 0,20175 \quad \text{m} \end{aligned}$$

Penghantar Cirebon – Ungaran

$$\begin{aligned} D_{sc}^b &= 1,09 \sqrt[4]{r \cdot d^3} \quad \text{m} \\ &= 1,09 \sqrt[4]{0,011775 \cdot (0,45)^3} \\ &= 0,19728 \quad \text{m} \end{aligned}$$

Kapasitansi saluran transmisi Penghantar Bandung Selatan – Cirebon

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{2fV}{\ln \frac{\text{GMD}}{D_{sc}^b}} \quad \text{F / km / fasa} \\ &= \frac{2f \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 10^3}{\ln \frac{14,86707}{0,20175}} \\ &= 1,2 \cdot 10^{-8} \quad \text{F / km / fasa} \end{aligned}$$

Kapasitansi saluran transmisi Penghantar Cirebon – Ungaran

$$\begin{aligned} C_2 &= \frac{2fV}{\ln \frac{\text{GMD}}{D_{sc}^b}} \quad \text{F / km / fasa} \\ &= \frac{2f \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 10^3}{\ln \frac{14,86707}{0,19728}} \\ &= 1,2 \cdot 10^{-8} \text{ F / km / fasa} \end{aligned}$$

Kapasitansi total saluran transmisi Bandung Selatan – Ungaran

$$C = 1,2 \cdot 10^{-8} \quad \text{F / km / fasa}$$

Admitansi paralel saluran transmisi Bandung Selatan – Ungaran

$$\begin{aligned} y &= j 2 \pi f C \\ &= j 3,768 \cdot 10^{-6} \angle 90^\circ \text{ Mho / fasa} \\ Y &= y_l \\ &= j 2 \pi f C l \\ &= j 2 \pi 50 \cdot 1,2 \cdot 10^{-8} \cdot 342,847 \end{aligned}$$

$$= j 1,2918.10^{-3} \text{Mho} / \text{fasa}$$

$$= 1,2918.10^{-3} \angle 90^\circ \text{Mho} / \text{fasa}$$

Dari persamaan (2.71), (2.72) dan (2.73) telah diperoleh untuk mencari persamaan konstanta bantu A, B, C dan D

Dengan memasukkan nilai :

$$Z = 95,30 \angle 84,90^\circ \text{ Ohm} / \text{fasa}$$

$$= 8,46 + j 94,9284 \text{ Ohm} / \text{fasa}$$

$$Y = 1,2918.10^{-3} \angle 90^\circ \text{ Mho} / \text{fasa}$$

$$= j 1,2918.10^{-3} \text{Mho} / \text{fasa}$$

$$ZY = 95,30 \angle 84,90^\circ \cdot 1,2918.10^{-3} \angle 90^\circ$$

$$= 0,123 \angle 174,90^\circ$$

$$= -0,123 + j 0,011$$

$$Z^2 Y^2 = (8,46 + j 94,9284)^2 \cdot (j 1,2918.10^{-3})^2$$

$$= 0,0149 - j 0,00268$$

$$= 0,0151 \angle -10,196^\circ$$

$$= (8,46 + j 94,9284)^3 \cdot (j 1,2918.10^{-3})^3$$

$$= 4,56.10^{-4} + j 1,66.10^{-4}$$

$$= 4,85.10^{-4} \angle 20,0033^\circ$$

maka

$$A = 1 + \frac{ZY}{2} + \frac{Z^2 Y^2}{24} + \frac{Z^3 Y^3}{720}$$

$$A = 0,9406 \angle < 3,25^\circ$$

$$= 0,939 + j 0,0549$$

$$B = Z \left( 1 + \frac{ZY}{6} + \frac{Z^2 Y^2}{120} + \frac{Z^3 Y^3}{5040} \right)$$

$$= 95,30 \angle 84,90^\circ$$

$$= 93,3559 \angle 84,9936^\circ$$

$$= 8,1469 + j 92,9997$$

$$C = Y \left( 1 + \frac{ZY}{6} + \frac{Z^2 Y^2}{120} + \frac{Z^3 Y^3}{5040} \right)$$

$$= 1,2918.10^{-3} \angle 90^\circ$$

$$= 1,265.10^{-3} \angle 90,0936^\circ$$

$$= -2,06610^{-6} + j 1,26510^{-3}$$

$$D = A = 0,9406 \angle 3,25^\circ$$

### Kenaikan Tegangan Di Sisi Terima

Diasumsikan tegangan kerja normal adalah 500 KV, maka arus pengisian ( $I_C$ ) pada saluran transmisi saat terjadi aliran arus :

$$I_C = C V_s$$

$$= (1,265.10^{-3} \angle 90,0936^\circ).$$

$$(500.000 \angle 0^\circ)$$

$$= 632,5 \angle 90,0936^\circ \text{ Ampere}$$

Arus pengisian ini akan menimbulkan daya reaktif kapasitif pada saluran transmisi yang besarnya adalah :

$$Q = \sqrt{3} I_C \cdot V_{RL}$$

$$= \sqrt{3} \cdot 632,5 \angle 90,0936^\circ \cdot 88675,1364$$

$$= 316,250002 \text{ MVAR}$$

Kenaikan tegangan pada sisi terima saluran transmisi :

$$Z = 95,30 \angle 84,90^\circ$$

$$= 8,46 + j 94,9284$$

$$I_C R = 632,5 \cdot 8,46$$

$$= 5.350,95 \text{ Volt}$$

$$I_C X = 632,5 \cdot 94,9284$$

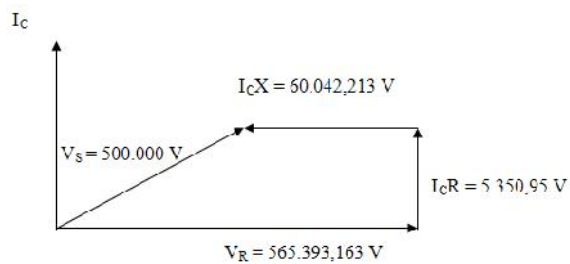
$$= 60.042,21 \text{ Volt}$$

$$V_R = V_s + (I_C R) + (I_C X)$$

$$= 500.10^3 + 5350,95 + 60.042,213$$

$$= 565.393,163 \text{ Volt}$$

Diagram vektor tegangan saluran transmisi beban rendah adalah :



Gambar 4.1 Diagram vektor tegangan saluran transmisi Bandung Selatan – Ungaran kondisi beban rendah

Jadi kenaikan tegangan di sisi terima :

$$\begin{aligned} V_{SL} &= 565.393,163 - 500.000 \\ &= 65.393,163 \end{aligned}$$

Volt

Prosentase kenaikan tegangan :

$$\begin{aligned} \% V_{SL} &= \frac{65.393,16}{500.10^3} \times 100 \% \\ &= 13,079 \% \end{aligned}$$

Pada saat beban rendah aliran daya (*load flow*) mengalir ke GITET Ungaran dikarenakan pembangkitan banyak yang beroperasi di wilayah barat (DKI Jakarta) dan Jawa Barat sehingga bila tidak ada kompensasi maka tegangan di GITET Ungaran mencapai **565.393,163 Volt**.

Hal tersebut tidak direkomendasikan karena melebihi batas operasional tegangan kerja yang diijinkan oleh PLN yaitu -10 % s/d +5 % artinya operasional tegangan dibawah nominal  $500.10^3$  Volt adalah

sampai 10% dan tegangan diatas nominal sampai 5 %.

### Kompensasi Dengan Reaktor Shunt

Dengan menggunakan kompensasi reaktor shunt arus pengisian ( $I_C$ ) dapat diturunkan sehingga tegangan sisi terima dapat diturunkan.

Derajat Kompensasi dimisalkan 70 %

### Kondisi sebelum dikompensasi

Konstanta umum saluran diberi notasi  $A_1$ ,  $B_1$ ,  $C_1$ , dan  $D_1$

$$A_1 = D_1 = 0,9406 \angle 3,25^\circ$$

$$B_1 = 93,3559 \angle 84,9936^\circ$$

$$C_1 = 1,265.10^{-3} \angle 90,0936^\circ$$

### Kondisi setelah dikompensasi

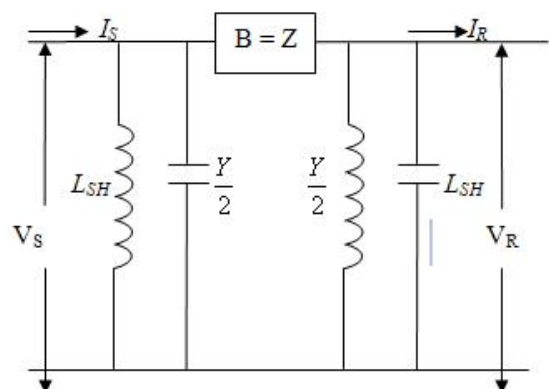
$$\frac{B_L}{B_C} = 0,7$$

Dimana

$$B_C = 1,265.10^{-3}$$

$$\begin{aligned} B_L &= 0,7 \cdot 1,265.10^{-3} \\ &= 8,855.10^{-4} \end{aligned}$$

Konstanta umum  $A_2$ ,  $B_2$ ,  $C_2$ , dan  $D_2$



Gambar 4 Konstanta ABDC untuk Reaktor Shunt

$$A_2 = D_2$$

$$B_2 = 0$$

$$C_2 = j 8,855.10^{-4}$$

Mencari arus IC setelah dikompensasi

$$\begin{aligned} I_C &= B_C |V_R| \left( 1 - \frac{B_L}{B_C} \right) \\ &= 1,256.10^{-3} . 500.10^3 (1 - 0,7) \\ &= 189,75 \angle 90,0936 \quad \text{Ampere} \end{aligned}$$

Besarnya penurunan arus pengisian (*charging current*)

$$\begin{aligned} I_{CHG} &= I_C \text{ sebelum dikompensasi} - I_C \text{ setelah dikompensasi} \\ &= 632,5 - 189,75 \\ &= 442,75 \quad \text{Ampere} \end{aligned}$$

Besarnya daya reaktif setelah dikompensasi:

$$\begin{aligned} Q &= \sqrt{3} . 189,75 . 288675,1364 \\ &= 94,875 \quad \text{MVAR} \end{aligned}$$

Dari data impedansi saluran :

$$\begin{aligned} Z &= 95,30 \angle 84,90^\circ \\ &= 8,46 + j 94,9284 \end{aligned}$$

Maka tegangan di sisi terima setelah dikompensasi

$$\begin{aligned} I_C R &= 189,75 . 8,46 \\ &= 1.605,285 \quad \text{Volt} \\ I_C X &= 189,75 . 94,9284 \\ &= 18.0126,6639 \quad \text{Volt} \end{aligned}$$

Sehingga

$$V_R = V_S + (I_C R + I_C X)$$

$$\begin{aligned} &= 500.10^3 + 1.605,285 + \\ &18.0126,6639 \end{aligned}$$

$$= 519.617,9489 \quad \text{Volt}$$

Jadi kenaikan tegangan disisi terima :

$$\begin{aligned} V_{SL} &= 519,617,9489 - 500.000 \\ &= 19.617,9489 \quad \text{Volt} \end{aligned}$$

Prosentase kenaikan tegangan :

$$\begin{aligned} \% V_{SL} &= \frac{19.617,9489}{500.10^3} \times 100\% \\ &= 3,92 \% \end{aligned}$$

Setelah dikompensasi dengan reaktor shunt kenaikan tegangan dibawah 5 % masih direkomendasikan oleh PLN (maksimal 5 % diatas tegangan nominal 500.000 volt.

Penurunan tegangan setelah dikompensasi :

$$\begin{aligned} \text{VD} \quad \% &= \frac{V_{R \text{ sebelum dikompensasi}} - V_{R \text{ setelah dikompensasi}}}{V_S} \times 100 \% \\ &= \frac{45.772,2141}{500.000} \times 100\% \\ &= 9,15 \% \end{aligned}$$

Acuan untuk prosentase penurunan tegangan dengan menggunakan reaktor shunt pada rumus (2.91) adalah :

$$\text{VD} \% = \frac{I_S R}{V_S} \times 100\%$$

Dengan asumsi saat beban rendah arus pada sisi kirim maksimal 2.000 A, maka :

$$\begin{aligned} \text{VD} \% &= \frac{2.10^3 . 8,46}{500.10^3} \times 100\% \\ &= 3,384 \% \end{aligned}$$

Dari analisis perhitungan prosentase penurunan tegangan lebih tinggi dari acuan, hal ini dikarenakan analisa perhitungan derajat kompensasi mempergunakan derajat yang paling tinggi yaitu 70 %. Hal ini dimaksudkan untuk memperbaiki tegangan kerja supaya mendekati tegangan kerja ideal (nominal) 500 KV.

### Analisis Perhitungan Besarnya

#### Induktansi Reaktor *Shunt*

Menentukan besarnya induktansi dari reaktor shunt dapat dicari dengan mengurangi panjang dielektrik saluran dengan mengasumsi tegangan  $V_R = V_S = 500$  KV menggunakan persamaan (2.89) maka didapat :

Sebelum dikompensasi :

Penghantar Bandung Selatan –  
Cirebon

$$\Theta_1 = \beta l$$

$$\beta = \sqrt{zy}$$

$$= \sqrt{0,278.3,768.10^{-6}} \frac{85,475 + 90}{2}$$

$$= 1.01.10^{-3} \quad \text{Radian per km}$$

$$\Theta_1 = 1.01.10^{-3}.119,167$$

$$= 0,1203 \text{ Rad} \cdot \frac{360^\circ}{2f}$$

$$= 6,9648^\circ$$

Penghantar Cirebon – Ungaran

$$\Theta_2 = \beta l$$

$$\beta = \sqrt{zy}$$

$$= \sqrt{0,277.3,768.10^{-6}} \angle \frac{59,60 + 90}{2}$$

$$= 9,717.10^{-3} \quad \text{Radian per km}$$

$$\Theta_2 = 9,717.10^{-4}.223,68$$

$$= 0,217 \text{ rad} \cdot \frac{360^\circ}{2f}$$

$$= 12,4543^\circ$$

$$\Theta = \Theta_1 + \Theta_2$$

$$= 6,9648^\circ + 12,4543^\circ$$

$$= 19,4191^\circ$$

Setelah dikompensasi panjang dielektrik yang dikehendaki  $17^\circ$  dipasang reaktor shunt ( $\Theta'$ )

$$\frac{\Theta}{\Theta'} = \frac{\sqrt{ZY'}}{ZY} = \frac{17}{19} = 0.875$$

$$Y' = (0,875)^2 \cdot Y ; Y = 1,2918.10^{-3}$$

Mho / fasa

$$= 0,00098904 \quad \text{Mho / fasa}$$

Dan  $\frac{Y'}{2} = 0,000494517 \quad \text{Mho / fasa}$

Maka,

$$\frac{Y}{2} - \frac{j}{X_{SH}} = 4,94517.10^{-4}$$

$$\frac{1}{X_{SH}} = 6,459.10^{-4} - 4,94517.10^{-4}$$

$$= 1,51383.10^{-4}$$

$$X_{SH} = 6.605,7615 \quad \text{Ohm / fasa}$$

Jadi,

$$L_{SH} = \frac{X_{SH}}{\omega}$$

$$= \frac{6.6605,7615}{314}$$

$$= 21,037 \quad \text{Henry/fasa}$$

Dari data terlihat  $X_{SH}$  di Bandung Selatan adalah 2500 Ohm / fasa dan di Ungaran juga sama besarnya yaitu 2500 Ohm / fasa. Bila kedua GITET dijumlahkan maka jumlah  $X_{SH}$  reaktor shunt adalah 5.000 Ohm / fasa berarti ada **deviasi 6.605,7615 – 5.000 ohm/ fasa = 1.605,750 ohm/ fasa**. Kekurangan jumlah  $X_{SH}$  dari kedua GITET tersebut dapat diserap/dikompensir oleh transformator kedua GITET karena transformator juga berfungsi sebagai penyerap daya reaktif. Dari analisa dan data di lapangan dapat dinyatakan reaktor shunt di GITET Ungaran saat sekarang masih **relevan** untuk dipergunakan.

## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perhitungan dan analisa sebelumnya, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Untuk mengatur tegangan pada sistem tenaga listrik Jawa Bali dalam kondisi beban rendah, pada saluran transmisi panjang tanpa pembangkit yaitu saluran Bandung Selatan–Ungaran dipasang Reaktor Shunt untuk mengkompensir MVAR jaringan dengan derajat kompensasi

$$\frac{B_L}{B_C} = 70\% \text{ yang dimaksudkan untuk}$$

menurunkan arus pengisian yang pada akhirnya untuk menurunkan tegangan jaringan mendekat atau sampai ideal (500 KV). Besarnya arus pengisian line (line charging) sebelum dikompensasi adalah 632,5 Ampere dan daya reaktif kapasitif 316,25 MVAR, sedangkan besarnya arus pengisian setelah dikompensasi adalah 189,75 Ampere dan daya reaktif 94,875 MVAR.

2. Prosentase kenaikan tegangan sebelum dikompensasi adalah 13,079 % (melebihi batas toleransi oleh PLN), setelah dikompensasi prosentase kenaikan tegangan adalah 3,92 % (ditoleransi oleh PLN). Jadi terdapat penurunan tegangan sebesar 9,15 %.
3. Nilai total reaktansi saluran Bandung Selatan–Ungaran setelah dikompensasi adalah 6.606,7615 Ohm / fasa, sedangkan total nilai induktansi reaktor shunt penjumlahan Bandung Selatan dan Ungaran adalah 5.000 Ohm / fasa sehingga ada deviasi sebesar **1.605,7615 Ohm / fasa** yang dapat dikompensasikan pada Trafo daya IBT 500/150/66 KV yang juga berfungsi sebagai penyerap daya reaktif. Dari data Reaktor Shunt 500 KV GITET Ungaran yang mempunyai

rating 105 MVAR dan nilai induktansi sebesar 2.500 ohm / fasa masih relevan untuk dipergunakan.

### **Daftar Pustaka**

- Hutauruk. TS. Ir. MSc, 1985, Transmisi Daya Listrik, Erlangga, Jakarta
- Weddy BM, 1988, Sistem Tenaga Listrik Edisi Ketiga, Aksara Persada Indonesia.
- William D. Stevenson. Ir, 1990, Analisa Sistem Tenaga Listrik, Erlangga.
- H. Hidayat. Ir, 1994, Rangkaian Listrik, Erlangga, Jakarta.
- Joseph A. Edminser. Ir, 1994, Sahat Pakpahan. Ir, Rangkaian Listrik, Erlangga, Jakarta.